

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ВУЛКАНИТОВОЙ СВЯЗКЕ

DEVELOPMENT OF METHODS AND EQUIPMENT TO STUDY THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF THE ABRASIVE MATERIALS ON A BUNCH OF VULCANITE

Б.А. Чаплыгин, В.Г. Шеркунов, Н.В. Судаков, А.Б. Чаплыгин
Южно- Уральский Государственный университет, г. Челябинск, пр. Ленина 76, dvig@susu.ac.ru,
alexchel99@mail.ru.

Abstract

Development of methods and experimental equipment to study the rheological properties of a viscoelastic medium filled with abrasive materials obtained the physical equations and the technique of adaptation to an experimental data.

Среда, подлежащая изучению, может быть квалифицирована как композиционная, содержащая абразивные зерна, вулканитовую связку и воздушные поры. Качественная иллюстрация материала показана на рис. 1.

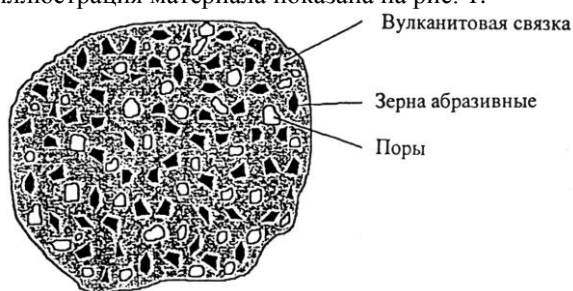


Рис. 1. Качественная иллюстрация структуры абразивного материала

В зависимости от требований к абразивному инструменту, которые определяются его назначением, соотношение компонентов исходной среды изменяется в широком диапазоне. Объем абразива от 38 до 63 %, пор от 24 до 50 %, связки от 0,5 до 38 %. Форма и размер абразивных зерен для различных марок исходного материала также существенно отличаются. Различие состава и структуры исходных материалов определяет их свойства в исходном состоянии и особенности поведения в процессе деформации.

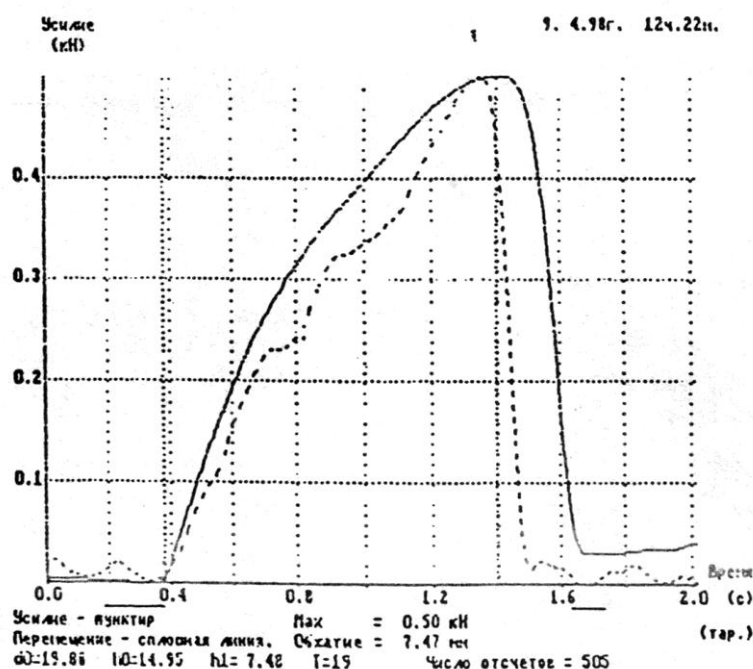
В основе вулканитовой связки лежит каучук, реологические свойства которого чувствительны к

температуре и скорости деформации [1], а после деформации каучука происходит явление релаксации и упругого последействия. Наличие пор и твердых (недеформируемых) включений очевидно вносит соответствующие коррективы в свойства классической упруговязкой среды.

Отмеченные положения дают основание предполагать о сложном поведении композиционной среды как в процессе деформации, так и в последеформационный период.

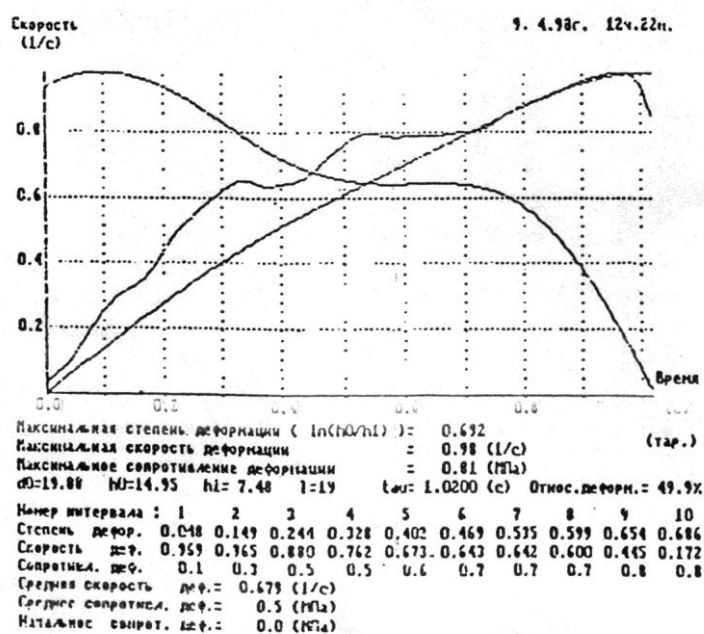
Для создания математической модели, адекватно отражающей реальный процесс деформации, необходимо знание реологических свойств среды, которые в настоящее время преимущественно устанавливают на основе опыта.

В отечественной и зарубежной литературе отсутствует опыт исследования реологических свойств абразивных материалов на вулканитовой связке, а, следовательно, и какая-либо информация об их свойствах. В связи с этим программа исследований предусматривала изучение спектра вопросов, связанных с поведением среды как в процессе деформации, так и в последеформационный период. Исследования проводились на модернизированном кулачковом пластометре [2], с выдачей на печать кривых зависимости интересующих параметров от времени (рис. 2, 3).



ОДИНАКОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛА 14A25HCH

Рис. 2. Первичная информация



ГРАФИКИ СКОРОСТИ, СТЕПЕНИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛА 14A25HCH

Рис. 3. Вторичная информация

Учитывая очевидные отличия свойств изучаемых материалов от сталей и сплавов, в традиционную методику эксперимента и обработки данных был внесен ряд изменений.

Так, по достижению заданного значения деформации, образец выдерживался под нагрузкой определенное время, в течение которого фиксировалось изменение усилия, т.е. изучался процесс релаксации при постоянной деформации.

Кроме того, специально разработанный профиль кулачка пластометра моделировал в одном опыте увеличение деформации по определенному закону до некоторого максимального значения

(загрузку) и последующее уменьшение деформаций также по определенному закону (разгрузку). Потребность в такой постановке опыта обуславливалась тем, что при прокатке за плоскостью выхода геометрического очага деформации условия разгрузки ограничены постепенно расширяющимся зазором.

С целью получения более достоверной информации в начальный период нагружения и в последеформационный период на порядок были уменьшены временные интервалы регистрации параметров.

Для расчета среднего нормального

напряжения по усилию сжатия в текущий момент времени необходимо знать площадь контакта образца с деформирующим инструментом. Непосредственный контроль площади, например, путем измерения диаметра образца в месте контакта с инструментом с последующим

пересчетом ($S = \frac{\pi d^2}{4}$) весьма проблематичен. В

связи с этим текущую площадь определяют из условия постоянства объема, полагая деформацию однородной (без образования бочки), а затем вносят коррекцию на бочкообразование с помощью аналитических зависимостей, например, работы [3].

Для большинства компактных материалов, упругое и остаточное изменение объема которых невелико, такой подход оправдан. Пористая абразивная среда на вязкой вулканитовой связке в зависимости от соотношения составляющих ее компонентов может иметь значительное как упругое, так и остаточное за счет уплотнения изменение объема. В связи с этим фактическая площадь контакта образца, находящегося под нагрузкой, может существенно отличаться от площади, рассчитанной из условия постоянства объема.

Способ поэтапной деформации образца, предполагающий нагрузку после каждого этапа с целью измерения текущей площади контакта среды, реологические свойства которой зависят от скорости и времени, по понятным причинам неприемлем. Более того, после разгрузки исключается учет изменения площади, вызванный упругими деформациями. Можно предложить следующие соображения относительно коррекции контактной площади образца в связи с изменением его объема.

При известной высотной (ε_h) деформации в текущий момент времени для определения текущего диаметра образца $d = d(t)$ достаточно знать коэффициент поперечной деформации

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_h} \right|, \quad (1)$$

где $\varepsilon_d = \ln \frac{d}{d_0}$ – линейная радиальная деформация, в дальнейшем называемая поперечной,

$$\varepsilon_h = \ln \frac{h}{h_0}.$$

Учитывая различие знаков ε_d и ε_h и общепринятое представление о коэффициенте поперечной деформации как о положительной величине, в (1) введен модуль.

Деформации ε_d и ε_h представим как сумму упругой и пластической составляющих

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_d &= \varepsilon_{dy} + \varepsilon_{dp}, \\ \varepsilon_h &= \varepsilon_{hy} + \varepsilon_{hp} \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Тогда

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_{dy} + \varepsilon_{dp}}{\varepsilon_{hy} + \varepsilon_{hp}} \right|. \quad (3)$$

В результате преобразований (3) получим $\nu = \nu_y \alpha_y + \nu_p \alpha_p$, (4)

где ν_y – коэффициент поперечной деформации для упругих составляющих – коэффициент Пуансона,

ν_p – коэффициент поперечной деформации для остаточных составляющих,

$\alpha_y = \frac{\varepsilon_{hy}}{\varepsilon_h}$, $\alpha_p = \frac{\varepsilon_{hp}}{\varepsilon_h}$ доли упругой и остаточной деформаций.

Учитывая очевидное равенство

$$\begin{aligned} \alpha_p + \alpha_y &= 1, \\ \nu &= \nu_y + \alpha_p (\nu_p - \nu_y), \text{ или} \\ \nu &= \nu_p + \alpha_y (\nu_y - \nu_p). \end{aligned} \quad (5)$$

Несложно убедиться, что при отсутствии остаточной деформации ($\alpha_p = 0$) $\nu = \nu_y$, а при $\nu_p = \nu_y$ имеем $\nu = \nu_p = \nu_y$, хотя вопрос о возможности совпадения этих коэффициентов остается пока открытым из-за ограниченности экспериментального материала. Из (5) также следует, что после разгрузки ($\alpha_y = 0$) $\nu = \nu_p$.

Для компактных материалов все параметры в правой части уравнений (5) известны, что дает возможность сделать оценку уравнений. Известно, что для сталей и сплавов $\nu_y = 0,25 \dots 0,35$, а

ν_p допустимо принимать равным 0,5. При заданной суммарной деформации долю упругой и остаточной составляющих нетрудно подсчитать, имея в виду, что упругая деформация составляет порядка 0,2 %. Например, при $\varepsilon_h = 0,2$ и $\nu_y = 0,35$ имеем $\varepsilon_y = 0,002$. По (5) получим $\nu = 0,4985$. Таков коэффициент поперечной деформации до разгрузки образца, справедливо принимаемый равным 0,5.

Для некомпактных материалов, обладающих упруговязкими свойствами, ν_y , ν_p , α_y и α_p очевидно будут зависеть от условий деформации и плотности материала.

В механике композиционных [4] и некомпактных [5, 6 и др.] материалов имеются

попытки теоретического расчета упругих констант и коэффициента Пуансона. Однако, известные решения пока далеки от совершенства. В частности, они не учитывают наличие в материале (кроме пор и зерен основы) третьей компоненты – связки, доля которой в общем объеме может быть значительной. Таким образом, предпочтение следует отдать экспериментальным исследованиям.

Методика экспериментального определения V представлена ниже. При известном V из формулы (1) не представляет труда найти текущий диаметр, а затем и площадь контакта образца с инструментом.

На площадь контактной поверхности принятым образом влияет бочкообразование, причем независимо от изменения объема. Для компактных материалов имеются достаточно корректные решения по формоизменению цилиндрических заготовок. В частности такое решение есть в работе [3]. Применительно к исследованию пористых тел формулы работы [3] для коррекции контактной площади в связи с бочкообразованием по всей вероятности будут недостаточно обоснованными.

В работе [7] дан анализ формоизменения при осадке пористого цилиндра в условиях прилипания на контактной поверхности, из которого следует.

1. Для малых плотностей материала распределение скоростей и деформаций по сравнению с компактным материалом при сжатии цилиндра существенно отличается.

2. По сравнению с течением цилиндра из компактного материала течение пористого цилиндра, видимо, может сопровождаться меньшим бочкообразованием благодаря возможности затекания материала в поры.

Результаты работ, посвященных анализу формоизменения при осадке некомпактных материалов, в том числе и работы [7], безусловно представляют теоретический и практический интерес. Вместе с тем, использовать их для коррекции контактной площади весьма проблематично по ряду причин. Решения как правило носят частный характер. Так, например, в [7] задача реализуется в предположении о прилипании на контактной поверхности. Исследования на пластометре предполагают условия, обеспечивающие по возможности близкую к однородной деформацию, что по понятным причинам исключает прилипание. Не останавливаясь подробно на других работах, отметим, что попытка найти достаточно простую и достоверную формулу для расчета контактной площади образца с инструментом по ходу деформации, которая бы учитывала изменение плотности (объема) и бочкообразование не привела к успеху. В результате было принято решение осуществлять коррекцию контактной площади при пластометрических исследованиях в связи с бочкообразованием по методике, используемой для компактных материалов, с перспективой разработки более совершенной методики. Для

снижения напряжений контактного трения, а следовательно и бочкообразования использовались политетрафторэтиловые (ПТФЭ) прокладки толщиной 0,05 мм.

Из производственной практики обработки давлением изучаемых композиционных материалов известна проблема получения изделий с наперед заданными размерами. Конечная толщина полосы (h_2) существенно отличается от зазора (h_1) между валками в нагруженном состоянии. Усматривать причину этого явления в упругой деформации клетки и упругом сплющивании валков не приходится, поскольку усилия и нормальные контактные напряжения для стальных и чугунных валков весьма незначительны. Причина состоит в значительном эластическом (упругом) восстановлении размеров полосы после снятия внешней нагрузки. Изучение поведения материала после разгрузки кроме очевидного практического значения имеет и теоретический интерес, связанный с явлением упругого последействия.

С помощью датчика перемещения, установленного при модернизации кулачкового пластометра, во всех опытах после практически мгновенного снятия нагрузки в течение последующих 60 с фиксировалось изменение высоты образца во времени. Первичная информация по $h = h(t)$ с помощью известных соотношений пересчитывалась на зависимость высотной деформации от времени ($\varepsilon(t)$). Обработкой массива опытной информации получали уравнение вида

$$|\varepsilon(t)| = \varepsilon_0 \left(1 - a \exp\left(\frac{-k}{t}\right) \right), \quad (6)$$

где ε_0 – суммарная деформация к моменту

$$\text{разгрузки} \left(\varepsilon_0 = \ln \frac{h_0}{h_1} \right);$$

a и k – экспериментальные константы.

Прикладное значение уравнения (6) состоит в следующем. Полагая в (6) $t = \infty$, получим остаточную деформацию

$$\varepsilon_{ост} = \varepsilon_0 (1 - a) \quad (7)$$

Из (7) видно, что параметр a представляет

долю упругой деформации, т.е. $a = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_0}$. Для

определения толщины образца (полосы) после деформации необходимо решить уравнение

$$\ln \frac{h_0}{h_1} = \varepsilon_{ост} \text{ относительно } h_2$$

$$h_2 = h_0 \exp(-\varepsilon_{ост}).$$

Физические уравнения для некомпактных материалов нуждаются в двух скалярных функциях

[8]

$$T = T(\rho_0, \Lambda, H, \varepsilon, \dots) \quad (8)$$

$$\sigma = \sigma(\rho_0, \Lambda, H, \xi, \varepsilon, \dots) \quad (9)$$

где T , H , Λ – соответственно интенсивность касательных напряжений, скоростей деформаций сдвига и деформаций сдвига;

ρ_0 – исходная плотность материала;

ε , ξ – степень и скорость объемной деформации;

σ – среднее нормальное напряжение.

Объемная деформация ε связана с текущей плотностью ρ [8]

$$\rho = \rho_0 \exp \varepsilon, \quad (10)$$

что позволяет при необходимости в (8) и (9) сделать соответствующую замену ε на ρ .

Исследование реологических свойств материалов на кулачковых пластометрах с учетом получения опытной зависимости (9) является проблематичной по причине технических

сложностей.

В связи с этим была поставлена задача анализа существующих методик получения опытных зависимостей типа (8) и (9) для некомпактных материалов, а при необходимости и разработки более совершенных методик и соответствующего оборудования.

Существует ряд методик опытного определения зависимостей (8) и (9). К наиболее простой в техническом отношении относится испытание цилиндрических образцов на сжатие плоскими полированными бойками при наличии хорошей смазки. Опытная информация должна обеспечить расчет Λ , ε , σ и T . В работе [8] для этих целей предлагаются следующие зависимости

$$\Lambda = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{R_1 h_0}{R_0 h_1} \right), \quad T = \frac{P}{\sqrt{3\pi R_1^2}}, \quad (11)$$

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{R_1^2 h_1}{R_0^2 h_0} \right), \quad \sigma = -\frac{P}{\sqrt{3\pi R_1^2}}, \quad (12)$$

где R_0 , h_0 , R_1 , h_1 – размеры образцов до и после испытания,

P – регистрируемое усилие при осадке.

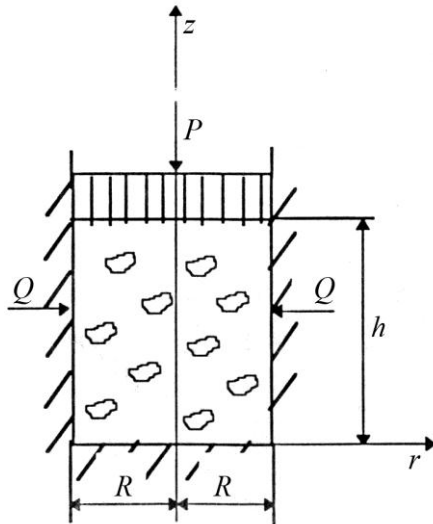


Рис. 4. Схема испытания образцов в закрытом штампе (жесткой матрице)

Испытания на свободную осадку обладают рядом недостатков: трудно обеспечить абсолютно однородную деформацию, образец не может быть приготовлен из порошка или гранул [8], при наличии бочки существует проблема корректного определения R_1 .

Более предпочтительно испытание некомпактных материалов путем сжатия в закрытом штампе (рис. 4). Для этого случая формулы (11) и (12) приводятся к виду [8]

$$\Lambda = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right), \quad T = \frac{\frac{P}{\pi R^2} - \frac{Q}{2Rh}}{\sqrt{3}}, \quad (13)$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right), \quad \sigma = -\frac{\left(\frac{Q}{Rh} + \frac{P}{\pi R^2}\right)}{3}, \quad (14)$$

из которых следует, что для расчета необходимо знать кроме R , h , P и силу Q , стремящуюся разорвать матрицу закрытого штампа.

К недостаткам испытания по схеме рис. 4 следует отнести следующее:

1. Даже при наличии хорошей смазки трудно устранить влияние трения о стенки контейнера на исследуемые параметры. Усилие P будет завышенным, а деформация неоднородна по высоте заготовки.

2. Существует проблема контроля в опытах силы Q . Действительно, непосредственный контроль силы Q (либо радиальных напряжений σ_{rr}) на внутренней стенке контейнера практически исключен. На наружной стенке контейнера возможен контроль параметров, зависящих от Q , например, напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}$ либо перемещения U_r . Однако, контроль этих параметров возможен, если контейнер не абсолютно жесткий. Это требование входит в противоречие с формулами (13) и (14), полученными из предположения отсутствия радиальной деформации заготовки. Необходима коррекция расчетных формул с учетом радиальной деформации контейнера. Последняя может быть соизмерима с исследуемой деформацией образца ε .

Недостатки рассмотренных выше способов испытаний в определенной мере могут быть устранены, если контакт заготовки и контейнера разделить слоем жидкости (рис. 5).

В опытах регистрируется усилие P и давление жидкости q , равное напряжению σ_{rr} . Упрощенная методика расчета T , σ , Λ и ε может быть получена, если полагать жидкость несжимаемой, что вероятно допустимо по отношению к пористому сжимаемому материалу.

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2}. \quad (17)$$

Учитывая, что в опытах (17) получим

$\sigma_{rr} = \sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{11} = \sigma_{22} = q$, $\sigma_{33} = \sigma_{zz}$ из

$$T \frac{1}{\sqrt{3}} |\sigma_{11} - \sigma_{33}| = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[q - \frac{P}{\pi R^2} + q \left(\frac{R_k^2}{R^2} - 1 \right) \right], \quad (18)$$

Среднее нормальное напряжение для тех же условий будет

$$\sigma = \frac{1}{3} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) = -\frac{1}{3} \left[2q + \frac{P}{\pi R^2} - q \left(\frac{R_k^2}{R^2} - 1 \right) \right], \quad (19)$$

Для расчета Λ и ε будут справедливы формулы (11) и (12), полученные в работе [8] для

Напряжение σ_{zz} , необходимое для расчета T , σ , может быть определено следующим образом

$$\sigma_{zz} = \frac{P}{\pi R^2} - q \left(\frac{R_k^2}{R^2} - 1 \right). \quad (15)$$

Учитывая, что при перемещении пресшайбы на величину Δh , регистрируемую в опыте, объем жидкости не изменится, найдем текущий радиус заготовки R

$$R = R_k \sqrt{1 - \frac{h_0}{h_0 - \Delta h} \left(1 - \frac{R_0^2}{R_r^2} \right)}. \quad (16)$$

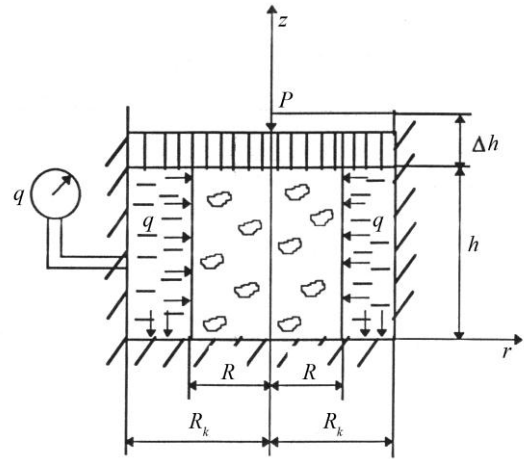


Рис. 5. Вариант установки, обеспечивающий контроль радиальных напряжений

Интенсивность касательных напряжений

должен не измеряться в опытах, а рассчитываться

по (16), т.е.

$$\Lambda = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{Rh_0}{R_0h_1} \right), \quad (20)$$

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{R^2h_1}{R_0^2h_0} \right). \quad (21)$$

В опытах по схеме рис. 5 исключается возможность изменения давления жидкости q независимым образом и поддержание q на определенном уровне, что по понятным причинам ограничивает возможности эксперимента. Недостаток устраняется, если установка будет снабжена каким-либо устройством, поддерживающим давление жидкости на заданном уровне, например, грузовым аккумулятором G (рис. 6).

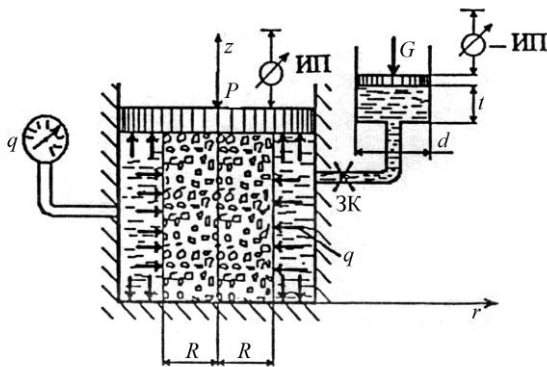


Рис. 6. Вариант установки, обеспечивающий регулирование радиальных напряжений

При закрытом запорном кране ЗК

$$R = \sqrt{R_0^2 \frac{h_0}{h} + R_k^2 \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) + \frac{d^2}{4h} (t_1 - t_0)}. \quad (22)$$

Для контроля параметра $t(t_0, t_1)$ требуется индикатор перемещения (ИП на рис. 6).

Недостаток рассмотренной установки (рис. 6) состоит в необходимости определения текущего радиуса заготовки по данным двух датчиков перемещения (ИП), что не способствует точности результатов.

На рис. 7 показан вариант установки, позволяющий моделировать сжатие образца в жесткой матрице, но при отсутствии трения со стороны стенок контейнера и возможности прямого контроля радиальных напряжений $\sigma_{rr} = q$. Отличительная особенность испытаний; по схеме рис. 7. состоит в том, что диаметр исходного образца должен быть в точности равен диаметру пресс-шайбы. В этом случае в процессе осадки изменение радиуса образца, как и в жесткой матрице произойти не может. В противном случае должен измениться объем жидкости. Последнее в силу гипотезы о несжимаемости жидкости произойти не может.

приходим к предыдущему варианту (рис. 5). При открытом кране давление жидкости будет

постоянным и равным $q = \frac{4G}{\pi d^2}$ независимо от

Δh – перемещения пресс-шайбы. Регулируя q путем изменения статической нагрузки G , можно получить различные схемы НДС. При $q = 0$ будем иметь свободную осадку (одноосное сжатие) с положительной деформацией σ_{rr} ($\sigma_{rr} > 0$, $R = R_0$), при закрытом кране, как уже отмечалось, будет реализовываться схема всестороннего сжатия (рис. 5), когда $\sigma_{rr} < 0$, $R < R_0$, при промежуточных значениях q между указанными крайними случаями реализуются промежуточные НДС и, в частности, при определенном значении q – схема деформации в жесткой матрице ($\sigma_{rr} = 0$, $R = R_0$). Для схемы рис. 6 в силе остаются расчетные зависимости (18) и (21). При этом R следует рассчитывать по формуле, полученной из условия несжимаемости жидкости

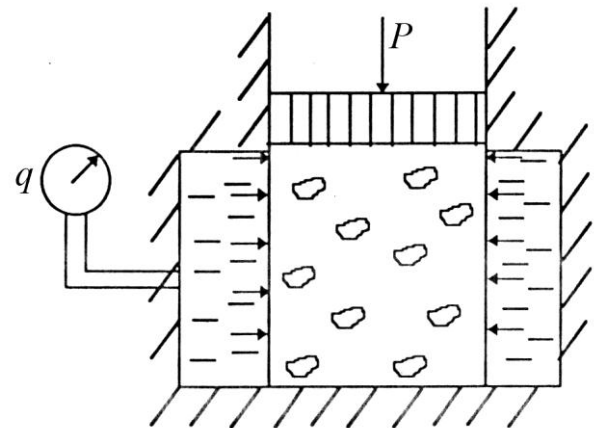


Рис. 7. Установка, моделирующая сжатие в жесткой матрице

Таким образом, при осадке по схеме рис. 7 по мере перемещения пресс-шайбы напряжения $q = \sigma_{rr}$, будут самоуставляться до значения,

необходимого для сдерживания радиальной деформации образца.

Недостаток способа состоит в необходимости подготовки образцов с высокой точностью диаметра, а также в необходимости точной установки образца в контейнер. Последняя проблема может быть решена, если высота исходного образца будет незначительно больше

высоты рабочей полости контейнера, что и показано на рис. 7. Этот прием не должен привести к значительным ошибкам.

Для расчета Λ и ε следует пользоваться зависимостями (20) и (21), полагая в них $R = R_0$, а T и σ рассчитывать по формулам

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(q - \frac{P}{\pi R^2} \right), \quad (23)$$

$$\sigma = -\frac{1}{3} \left(2q + \frac{P}{\pi R_0^2} \right). \quad (24)$$

Для исследования схемы всестороннего равномерного сжатия может быть использован процесс гидростатического прессования (рис. 8). При этом давление жидкости в камере может быть создано либо перемещением плунжера, либо нагнетанием жидкости в камеру.

Покажем методику обработки результатов опытов по схеме рис. 8.

При этом приняты следующие обозначения:

P – усилие,

$S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь поперечного сечения рабочей полости,

$\sigma = \frac{P}{S}$ – гидростатическое давление,

h_0, h_1, h_2 – соответственно высота рабочей полости до загрузки ($P = 0$), при действии усилия P и после разгрузки,

$\Delta h = h_0 - h_1$ – изменение высоты рабочей полости в результате загрузки,

$\Delta h_1 = h_2 - h_1$ – изменение высоты рабочей полости при разгрузке,

V_0 – исходный объем испытуемого образца,

$V_{pn0} = h_0 S$ – исходный объем рабочей полости,

$V_{жс0} = V_{pn0} - V_0$ – исходный объем жидкости.

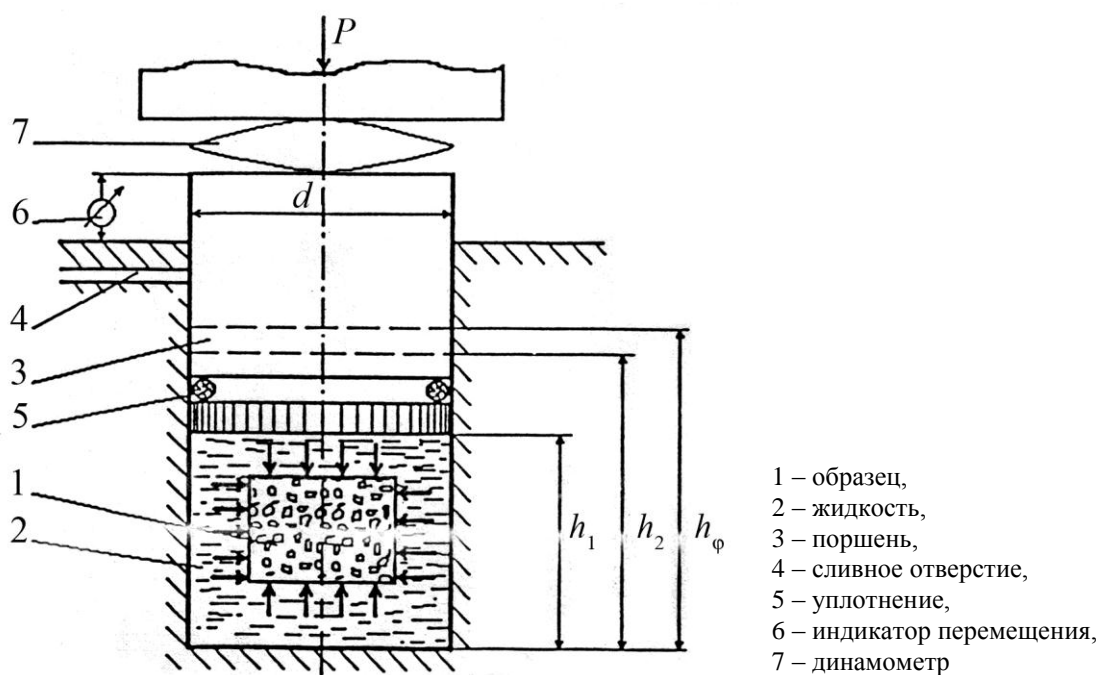


Рис. 8. Установка для исследования объемной деформации в условиях всестороннего равномерного сжатия

При известных выше указанных параметрах последовательность расчета следующая.

Изменение объема рабочей полости при загрузке

$$\Delta V_{pn} = (h_0 - h_1)S. \quad (25)$$

Очевидно, что

$$\Delta V_{pn} = \Delta V_{жс} + \Delta V, \quad (25)$$

где $\Delta V_{жс}$ – изменение объема жидкости,
 ΔV – изменение объема образца.

Известно, что объемная деформация жидкости носит упругий характер

$$\Delta V_{жс} = V_{жс} \left(1 - \exp \left(\frac{-3\sigma}{k_{жс}} \right) \right), \quad (27)$$

где $k_{жс}$ – модуль объемной деформации
 жидкости.

С учетом (26) и (27) изменение объема образца

$$\Delta V = \Delta V_{pn} - \Delta V_{жс}. \quad (25)$$

Тогда

$$\varepsilon = \frac{1}{3} \ln \frac{V_0}{V_1} = \frac{1}{3} \ln \frac{V_0}{V_0 + \Delta V}. \quad (29)$$

Суммарное изменение объема образца, находящегося под нагрузкой, складывается из упругого изменения объема ΔV_y и остаточного за счет уплотнения ΔV_p .

принимает исходное значение, то остаточное изменение объема рабочей полости будет характеризовать остаточное изменение объема образца.

Следовательно

Так как объем жидкости после разгрузки

$$\varepsilon = \frac{1}{3} \ln \frac{h_0}{h_2}. \quad (30)$$

В результате аддитивности натуральных

деформаций

$$\varepsilon_y = \varepsilon - \varepsilon_p. \quad (31)$$

Таким образом, опыт позволяет получить зависимости $\sigma(\varepsilon)$, $\sigma(\varepsilon_y)$, $\sigma(\varepsilon_p)$ и определить соответствующие модули объемной деформации. Предложенные выше варианты методик для получения опытных зависимостей типа (8) и (9) дают возможность выбора с учетом конкретных обстоятельств. При этом следует иметь в виду, что непосредственный контакт жидкости с пористым образцом может привести к проникновению жидкости в поры и существенно исказить картину объемной деформации.

Весьма актуальной для пористого материала

является проблема определения коэффициента поперечной деформации ν , поскольку он связан с величиной объемной деформации, формоизменением, упругими константами, входит в условие пластичности и физические уравнения. Существует целый ряд попыток теоретического определения ν , описанных в [5], однако данные расчета существенно отличаются от результатов эксперимента. Например, в работе [6] получено теоретическое значение коэффициента поперечной деформации

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{1 - \frac{1}{2} \frac{(1 - \Pi)^2}{\ln^2 \frac{1}{\Pi}}}{1 + \frac{1}{4} \frac{(1 - \Pi)^2}{\ln^2 \frac{1}{\Pi}}}, \quad (32)$$

где Π – пористость материала.

При $\Pi = 0$ для компактного материала получаем $\nu = 0,5$, что говорит о его несжимаемости и непригодности (40) для анализа процесса в упругой области деформации.

Пока, очевидно, следует отдавать

предпочтение экспериментальным исследованиям параметров материала, определяющих его реологические свойства. Как отмечается в работе [9], вопрос об оперативной экспериментальной оценке упругих констант далеко не прост, поэтому усилия большинства исследователей сейчас направлены на методическую отработку способов

определения коэффициента поперечной деформации на стадии больших пластических деформаций.

В работе [9] предлагается следующая методика определения коэффициента поперечной деформации.

Пористые спеченные образцы диаметром 10

$$v = \frac{\ln \left(\frac{\sqrt[2]{\frac{V}{\pi h_1}}}{d_0} \right)}{\ln \frac{h_0}{h_1}}, \quad (33)$$

где V – текущий объем образца, определяющийся гидростатическим взвешиванием;

h_1 и h_0 – текущая и начальная высоты;

$$v = \frac{1}{2}(1 - \Pi)^2. \quad (34)$$

В [9] отмечается, что соотношение (34) подтверждается на ряде других материалов.

Нетрудно показать, что в (33)

$$\sqrt[2]{\frac{V}{\pi h_1}} = d_1, \quad (35)$$

следовательно

$$v = \frac{\ln \frac{d_1}{d_0}}{\ln \frac{h_0}{h_1}}. \quad (36)$$

Отказ от непосредственного контроля текущего диаметра d_1 вероятно был обусловлен бочкообразованием образца и необходимостью вычисления среднего диаметра. Вместе с тем для определения текущей плотности расчет среднего по высоте диаметра образца через его объем следует признать удачным приемом. Однако процедура измерения объема после снятия нагрузки исключает определение V в области упругой деформации.

Для материалов, характеризующихся значительными упругими деформациями, пренебрегать которыми недопустимо, следует осуществлять контроль размеров образца, находящегося как под нагрузкой, так и после разгрузки. Это позволит установить коэффициенты поперечной деформации в упругой и пластической области.

По результатам измерений образца в нагруженном состоянии определяется значение V , характеризующее суммарную поперечную деформацию, вызванную упругими и остаточными явлениями.

мм и высотой 10 мм испытывались на сжатие. Для уменьшения контактного трения использовались политетрафторэтиленовые прокладки толщиной 0,05 мм. Производилась дробная деформация разнопористых образцов.

Значение коэффициента поперечной деформации определялось по формуле

d_0 – начальный диаметр.

После обработки результатов получен полином вида

Образец разгружается и по истечении определенного времени повторяется измерение высоты и диаметра (диаметров).

По результатам измерений образца после разгрузки определяется коэффициент V_p , соответствующий остаточным деформациям.

$$v_p = \frac{\ln \frac{d_2}{d_0}}{\ln \frac{h_0}{h_2}}, \quad (37)$$

где d_2 и h_2 – соответственно диаметр и высота образца после разгрузки.

Коэффициент V_y для упругой деформации рассчитывается по формуле, вытекающей из (5)

$$v_y = \frac{\alpha_p v_p - v}{\alpha_p - 1}, \quad (38)$$

$$\text{где } \alpha_p = \frac{\ln \frac{h_0}{h_2}}{\ln \frac{h_0}{h_1}}.$$

Исследование коэффициента поперечной деформации при одноосном сжатии не позволяет выявить зависимость V от гидростатического давления, а, следовательно, и от плотности материала. В этой связи можно предложить экспериментально-аналитическое определение коэффициента поперечной деформации для малых упруго-пластических деформаций из опытов на осадку образцов в условиях гидростатического

сжатия.

Для

малых

упруго-пластических

деформаций

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E} [\sigma_{rr} - \nu(\sigma_{\varphi\varphi} + \sigma_{zz})], \quad (39)$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{E} [\sigma_{\varphi\varphi} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{rr})], \quad (40)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi})]. \quad (41)$$

В нашем случае однородной деформации ($\sigma_{rr} = \sigma_{\varphi\varphi}$) первые два уравнения тождественны и приводятся к виду

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E} [(1 - \nu)\sigma_{rr} - \nu\sigma_{zz}]. \quad (42)$$

Решая совместно (41) и (42), получим

$$E = \frac{\sigma_{zz} - 2\nu\sigma_{rr}}{\varepsilon_{zz}}, \quad \nu = \frac{\frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{zz}}\sigma_{zz} - \sigma_{rr}}{\left(2\frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{zz}} - 1\right)\sigma_{rr} - \sigma_{zz}}. \quad (43)$$

перепишем (43)

Введя обозначения $\bar{\sigma}_{rr} = \frac{\sigma_{rr}}{\sigma_{zz}}$, $\bar{\varepsilon}_{rr} = \frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{zz}}$,

$$E = \frac{\sigma_{zz}}{\varepsilon_{zz}} (1 - 2\nu\bar{\sigma}_{rr}), \quad (44)$$

$$\nu = \frac{\sigma_{zz}(\bar{\varepsilon}_{rr} - \bar{\sigma}_{rr}) - \sigma_{rr}}{\sigma_{zz}[(2\bar{\varepsilon}_{rr} - 1)\bar{\sigma}_{rr} - 1]} = \frac{\bar{\varepsilon}_{rr} - \bar{\sigma}_{rr}}{(2\bar{\varepsilon}_{rr} - 1)\bar{\sigma}_{rr} - 1}. \quad (45)$$

В правой части уравнений все параметры известны из опытов.

В частных случаях:

1) Жесткая матрица, $\bar{\varepsilon}_{rr} = 0$

$$\nu = \frac{\bar{\sigma}_{rr}}{\bar{\sigma}_{rr} + 1}, \quad (46)$$

где $\bar{\sigma}_{rr} = \frac{q}{\sigma_{zz}}$.

2) При $\bar{\sigma}_{rr} = 0$ ($q = 0$) – одноосное сжатие

$$|\nu| = \bar{\varepsilon}_{rr} = \frac{\varepsilon_{rr}}{\varepsilon_{zz}}. \quad (47)$$

Наибольший интерес представляет деформация в условиях, моделирующих жесткую матрицу, так как коэффициент поперечной деформации зависит только от соотношения контролируемых в опыте напряжений, т.е. от

$$\frac{\sigma_{rr}}{\sigma_{zz}} = \frac{q}{\sigma_{zz}}.$$

Для компактного материала $\nu = const$.

Это означает, что при увеличении в опытах усилия,

следовательно и σ_{zz} , отношение $\frac{q}{\sigma_{zz}}$ должно

остаться постоянным. При этом параметр ν , определенный по (46), может быть сравнен с табличным для компактного материала. При положительном результате предложенная методика эксперимента и уравнение (46) могут быть взяты за основу для расчета ν некомпактных материалов. Для некомпактных материалов следует ожидать зависимость ν от исходной пористости и

отношения $\frac{q}{\sigma_{zz}}$.

В работе [7] приводятся экспериментальные значения коэффициента бокового давления при осадке в жесткой матрице

$$X = \frac{1}{h} \int_0^h \frac{\sigma_{rr}}{\sigma_{zz}} dz, \quad (48)$$

представляющего средне-интегральное значение

параметра $\frac{\sigma_{rr}}{\sigma_{zz}}$.

Для порошков сплавов ВК-0, ВК-2, ВК-15, ВК-30 и ВК-60 коэффициент X колеблется от 0,37 до 0,46 [7].

Рассчитав V по (46) для приведенных значений $\frac{\sigma_{rr}}{\sigma_{zz}}$, получим изменение V от 0,27 до 0,31, что не противоречит известным положениям о значениях V ($0 < V < 0,5$) и тем самым подтверждает возможность использования предложенной методики.

Список литературы

1. Стереорегулярные каучуки. Часть 2. Под ред. У. Солтмена. Пер. с английского. – М.: Мир, 1981. – 512 с.
2. А.С. СССР №1619162. Кулачковый пластометр / А.П. Смолин, В.И. Крайнов, В.С. Кропачев // Б.И. – 1991. – №1.
3. О структуре контактных условий при прокатке / Хайкин Б.В., Смирнов В.К., Тарновский И.Я. и др. // Известия Вузов. Черная металлургия. 1966. – №9. – с. 79 – 83.
4. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 372 с.
5. Лаптев А.М., Ободовский Е.С. Экспериментальная проверка теории пластичности пористых материалов. – В кн. Исследование по механике деформируемых сред. – Иркутск: ИЛИ, 1982. – С 38 – 43.
6. Теория деформирования пористых материалов с неупрочняющейся матрицей. Рудской А.Н., Григорьев А.К. Обработка металлов давлением. Межвузовский сборник. – Свердловск: УПИ им. С.М. Кирова, 1986. – С 38 – 44.
7. Логинов Ю.Н. Формоизменение пористого цилиндра при осадке // Обработка металлов давлением. Межвузовский сборник. – Свердловск: УПИ им. С.М. Кирова, 1986. – С. 23 – 28.
8. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
9. Физико-механические свойства и уплотняемость спеченных металлов при обработке давлением / Григорьев А.А., Крюков А.А., Рудской А.И. Обработка металлов давлением. Межвузовский сборник. – Свердловск: УПИ им. С.М. Кирова, 1986, – С 14 – 18.